УДК 621.001.5;621.311;621.316.9;621.313

ЦИФРОВАЯ ТРЕХФАЗНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ТЕПЛОВЫМИ ЭНЕРГОБЛОКАМИ

К.И. Заподовников, Д.А. Савин*, Ю.Н. Тановицкий*

Томский политехнический университет
*Томский университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: zapod@mail.ru, tyn@mail.ru

Представлена модель энергосистемы, работающая в реальном масштабе времени с неограниченным интервалом моделирования, предназначенная для исследования быстрых электромагнитных и длительных электромеханических процессов. В состав модели входят два тепловых энергоблока с синхронными генераторами, синхронные и асинхронные машины, источник неограниченной мощности, блочные трансформаторы, линии электропередачи, пассивная нагрузка и коммутационный блок для имитации повреждений типа короткое замыкание и разрыв. Показаны соответствие параметров модели паспортным характеристикам синхронной машины, верное поведение блока в пусковых, переходных и стационарных режимах. Описаны возможности модели, язык формирования заданий и средства визуализации результатов.

В настоящее время происходит создание малых технологических электрических систем на базе местных или сопутствующих первичных энергетических источников. В нефтегазовой отрасли распространяются тепловые газотурбинные станции. Мощности таких систем зачастую покрывают полностью собственные производственные нужды и тяготеют к автономной работе. Распространенный в больших электроэнергетических системах (ЭЭС) способ управления основан на разделении движений на медленные и быстрые [1, 2]. Эта технология оправдана и оптимальна для крупных ЭЭС. Для анализа соответствующих режимов и процессов создан специализированный аналитический и инструментальный аппарат, эксплуатация которого осуществляется отделами узких специалистов. Используемые при этом модели «подтянуты» к действующей концепции разделения единого процесса на несколько и, отражая главные свойства ЭЭС для соответствующего вычленения, каждая отдельная модель теряет некоторую часть свойств реальной системы, т.е. огрубляет действительное поведение объектов. Использование узкоспециализированного инструментария решает основную долю эксплуатационных задач. Однако, в случаях, когда развитие аварийных ситуаций охватывает широкий спектр временных возмущений – от быстрых электромагнитных до медленных системных движений, возникает потребность интегрирования разрозненных результатов в целостную картину. Здесь приходится уповать на опыт и искусность исследователей. Применение полнофазных физически подобных моделей устраняет описанный методический недостаток технологии анализа поведения системы по частям [3]. Положительным свойством этих моделей является возможность непосредственного сопоставления результатов моделирования с записями регистраторов аварийных ситуаций. Такие модели максимально приближены к свойствам реальных энергосистем. Программирование и восприятие результатов не требует существенного абстрагирования от реальности и поэтому, кроме исследовательских функций, они могут выполнять функции тренажеров работников различных специальностей, а не только диспетчерского персонала.

Математическая имитационная модель с позиции исследователя воспроизводит определенные свойства ЭЭС точно так же, как и физическая модель. Цифровые, аналоговые и физические модели мало пригодны для получения результатов в аналитической форме. В то же время они позволяют изучать реальный объект, в нашем случае – ЭЭС, оптимизировать его поведение, получать качественные выводы о возможности функционирования даже в аварийных режимах. И все это может быть многократно повторено в ходе экспериментов с разными условиями.

Между физической и математической имитационной моделью есть различия [4]. Физически подобные модели чаще всего работают в реальном времени или в ускоренном. Основное требование физического воплощения – необходимая степень подобия. Закономерности функционирования реального объекта в них воспроизводятся автоматически. Отпадает необходимость выявления и математической формализации этих закономерностей, по сути, отпадает необходимость познания способа функционирования элементов объекта. В компьютерных или аналоговых моделях основная нагрузка по обеспечению адекватности ее поведения поведению реальному объекту падает на математически формализованные знания о свойствах объекта в целом и его элементов. Аналоговые электрические модели ЭЭС [3], подобно физическим, также обеспечивают высокую скорость моделирования. Их вычислительная эффективность практически пропорциональна сложности математических моделей, т.к. время решения не зависит от размерности системы дифференциальных уравнений. Однако у аппаратных аналоговых вычислителей есть существенные недостатки: высокая стоимость моделей, отсутствие универсализма (узкая специализация), принципиальная невозможность сохранения состояний, что замедляет проведение экспериментов.

Компьютерные модели свободны от перечисленных недостатков аналоговых вычислителей. В их основе, как и у аналоговых, математическая модель в форме нелинейных алгебро-дифференциальных уравнений, состоящая, в свою очередь,

из моделей компонентов. Особые составляющие компьютерной имитационной модели – это численные схемы, соответствующие используемым методам интегрирования, программа и выполняющее ее аппаратное обеспечение, в простейшем случае – персональный компьютер.

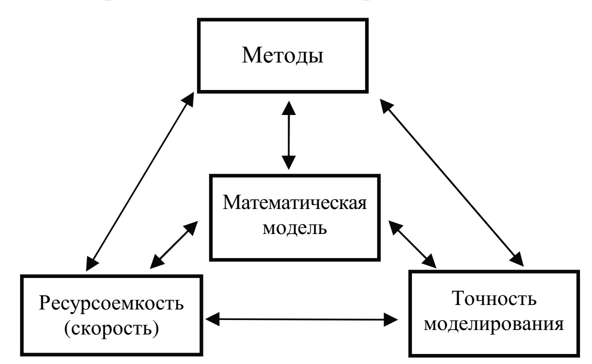


Рис. 1. *Взаимосвязь методов, математических методов и характеристик имитационной модели*

Основными качественными характеристиками имитационной модели является точность и ресурсоемкость, которую можно выразить через затраты машинного времени на шаг интегрирования. Взаимосвязи, показанные на рис. 1, на практике означают, что попытка существенно улучшить что-либо, например, добавить дополнительные уравнения в модели, скорее всего, негативно отразится на остальном – в частности, на скорости выполнения расчетов и точности. Кроме того, модели должны соответствовать методам, которые в свою очередь, должны гарантировать устойчивость расчетов. Особенность стандартных пакетов состоит в том, что заранее неизвестны ни модели, ни окружение моделирования, поэтому при их разработке исходят из худшего – стараясь в таких условиях гарантировать "надежность", порою закрывая глаза на скорость моделирования и даже на точность. В то же время, отталкиваясь от конкретных целей моделирования, опираясь на свойства конкретной модели, понимая, где допустимы компромиссы, что известно только исследователю, и, порою, выявляется только в ходе экспериментов, можно повышать качество моделирования многократно [5]. Вариант созданной имитационной модели ЭЭС (рис. 2), является результатом множества таких компромиссов и сбалансирован в отношении скорости и точности. Относительно медленные процессы в парогенераторе с постоянными времени на уровне десятых долей секунд и более моделируются явными методами; относительно быстрые процессы в электрических линиях с постоянными в десятки миллисекунд и менее – неявными. Ядро модели написано на языке C++. Функции моделирования работают в отдельных потоках. Всё это позволило достичь скорости расчетов 50 мкс на шаг интегрирования при использовании процессора Athlon XP 2500 и числе уравнений около двухсот, что соответствует режиму моделирования в реальном времени. При моделировании ЭЭС на частоте 50 Гц шаг 500 мкс уже обеспечивает достаточную точность в неаварийных режимах. При исследовании быстрых процессов при коротких замыканиях шаг может составлять единицы микросекунд и менее. Использованные приемы программирования позволили применить высокоточные модели синхронных машин и тепловых энергетических установок с системами регулирования и автоматики, а также модели трансформаторов, линий электропередач и нагрузок [3]. Схема ЭЭС, с помощью которой производилась идентификация свойств элементов и моделирование процессов, приведена на рис. 2.

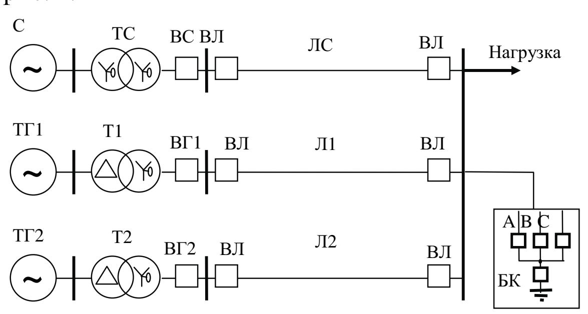


Рис. 2. *Структурная схема цифровой модели: С – система; ТГ1, ТГ2 – турбогенераторы; Т1, Т2 – трансформаторы; ЛС, Л1, Л2 – линии электропередач, БК – коммутационный блок; ВС, ВГ и ВЛ – выключатели*

Первичная силовая установка представлена источником рабочего тела (пара или газа) с программно-управляемыми параметрами и турбиной с цилиндрами высокого, среднего и низкого давлений с системой регулирования. Система автоматического регулирования турбины (АРТ) представлена четырьмя элементами. Во-первых, автоматическим регулятором скорости вращения турбогенератора с зоной нечувствительности около 3...4 % и устройством коррекции начальной неравномерности, компенсирующим влияние на приемистость турбины пара, аккумулированного в промперегревателях. Во-вторых, автоматикой предотвращения повышения скорости вращения турбины до установки срабатывания центробежных выключателей турбины при быстром сбросе нагрузки генератора. В-третьих, точным регулятором мощности турбины, обеспечивающим вторичное регулирование частоты и активной мощности. И, наконец, каналом быстрой кратковременной разгрузки турбины и быстрого длительного ограничения мощности по сигналам противоаварийной и режимной автоматики энергосистемы. Реальным прототипом модели АРТ является электрогидравлическая АРТ, электрическая и гидравлическая части которой увязываются в электрогидравлическом преобразователе. Датчики системы АРТ представлены инерционными звеньями, по свойствам подобными механическому и электрическому датчикам скорости, электрическим датчикам активной мощности генератора и давления пара в линии промперегрева. Исполнительными элементами АРТ являются гидравлические сервомоторы регулирующих клапанов ци-

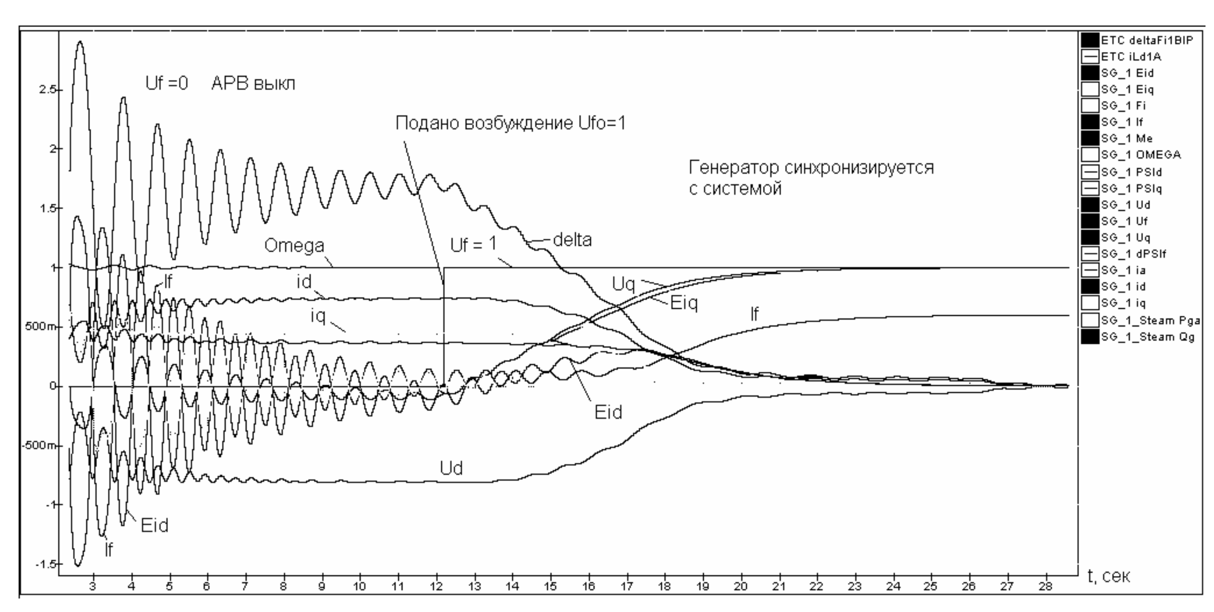


Рис. 3. *Результат моделирования процесса синхронизации СГ без нагрузки при подаче номинального напряжения возбуждения на обмотке*

линдров высокого и среднего давлений и представлены в модели соответствующими инерционными звеньями с ограничениями [7, 8].

Математическая модель синхронного генератора использована в форме системы дифференциальных уравнений в ортогональных координатах **dq**, жестко связанных с его ротором, с представлением параметров статора и ротора во взаимной системе относительных единиц [1–3]. В модели заданны следующие пространственные соотношения: оси **dq** вращаются против часовой стрелки; ось **d**, совпадающая по положению с осью ротора, опережает ось **q**. В описываемой модели не учтены потери в стали и ее насыщение, наличие емкостей между обмотками и прочими деталями внутри машины, а также зависимость активных сопротивлений обмоток от температуры. Ротор машины представлен многоконтурной схемой замещения в виде нескольких параллельно включенных активно-индуктивных цепочек с постоянными параметрами в двух осях **d** и **q** [3]. Переход от токов и напряжений модели синхронной машины (СМ) в осях **dq** к токам и напряжениям трехфазной система **ABC0** выполнен в соответствии с преобразованиями Парка-Горева [1–3].

Для визуализации и обработки параметров использованы библиотеки из пакета ASIMEC [6], который создается на кафедре промышленной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Программа позволяет настраивать параметры моделирования, наблюдать значения переменных и управлять выводом графиков посредством меню, консоли и скриптообразующего языка. С помощью применения технологии многопоточности, все операции можно выполнять во время моделирования. По ходу работы ведется протокол команд. Наиболее употребительные команды: set – устанавливет значения параметров модели; sim N – запускает моделирование N шагов; save и load – сохраняют и загружают состояния. Пример:

```
set RLA 30; // приравнять RLA (активное сопротивления нагрузки в фазе А) 30;
sim 1000; // выполнить 1000 расчетов с текущим значением шага интегрирования
save "file"; // сохранить текущее состояние модели в файл file.scp
load "file"; // загрузить данные из file.scp
```

Общее представление о свойствах и функционировании трехфазной цифровой модели можно получить через описание экспериментов. На рис. 3 приведена запись эксперимента по синхронизации ненагруженного генератора ТГ1 с сетью. Невозбужденная явнополюсная машина с включенной системой АРТ и отключенным автоматическим регулятором возбуждения (АРВ) раскручена до скорости, близкой к синхронной скорости системы; ТГ подключается к системе в произвольный момент времени (внутренний взаимный угол **delta** более +90°) с заметными возмущениями внутреннего состояния; на 12-й секунде скачком подается номинальное возбуждение **Uf**=1, растут ток обмотки возбуждения **If**, внутренняя ЭДС **Eiq** и снижаются практически до нуля угол **delta** и внутренняя ЭДС **Eid**. Наблюдаемое поведение соответствует поведению реальных СМ.

На рис. 4 изображен следующий за синхронизацией ТГ этап быстрой загрузки до номинальной мощности включенного в систему турбогенератора при работающих АРТ и АРВ. С целью выявления скоростных возможностей теплосиловой установки условия опыта изменены относительно существующих на практике, для чего постоянная времени механизма управления турбиной снижена до **Tmut**=1 с. Ускоренная подача пара на турбину возмущает систему регулирования турбины. Заметны

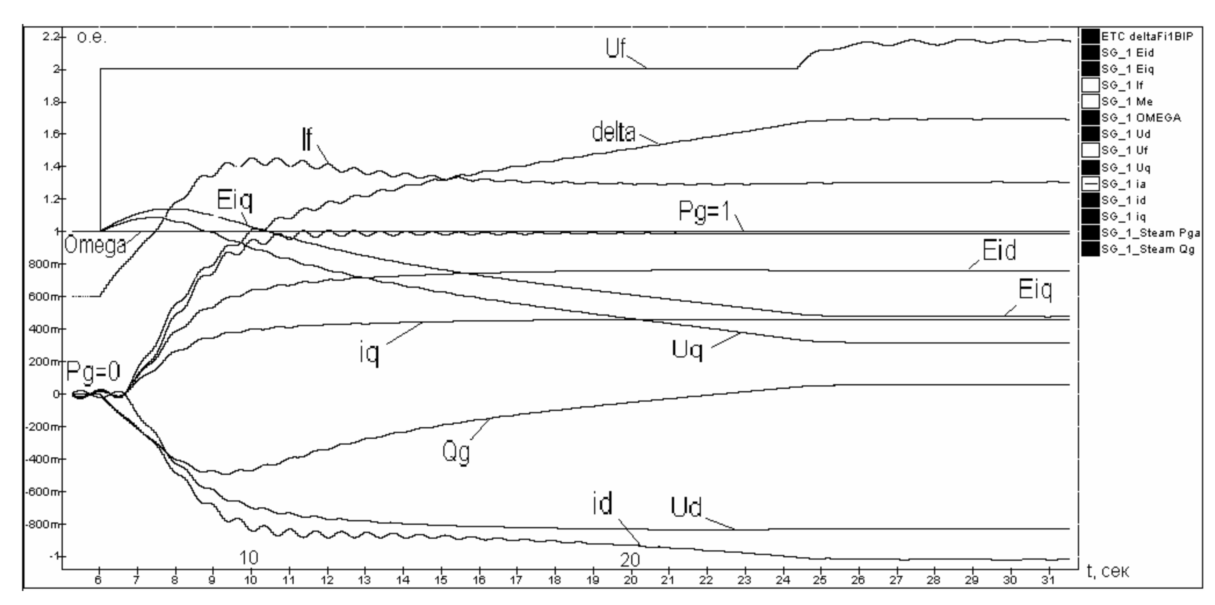


Рис. 4. *Процесс быстрого набора мощности турбоагрегатом*

значительные низкочастотные колебания, обусловленные АРТ. Однако нарушения устойчивости в целом не происходит. Внутренний взаимный угол **delta** увеличивается и стабилизируется на уровне более 90°.

Для идентификации свойств модели в области быстрых электромагнитных процессов проведены два эксперимента по имитации однофазного и двухфазного коротких замыканий вблизи шин блочного трансформатора. Параметры СМ мощностью 67 МВА – Uном=10,5 кВ; Iном=3,68 кА; Xad=0,85; Xaq=0,45; Xsigma=0,15; XsigmaD=0,18; XsigmaQ=0,23; Xsigmaf=1,03 – взяты из примера 9.1 [8], а параметры трансформатора 10,5/115 соответствуют ТРДЦН-63000/110. На рис. 5 приведены графики фазных токов и напряжений в месте возникновения однофазного короткого замыкания (КЗ) К(1). Предшествующий КЗ режим соответствует холостому ходу СМ: фазные токи равны 0, напряжения фаз – номинальные. В момент замыкания напряжение на фазе А упало до нуля и в этой же фазе появилась апериодическая составляющая и убывающая периодическая. В оставшихся здоровых фазах ток остался нулевым, а амплитудные значения напряжений уменьшились. В токе возбуждения появилась вторая гармоника. Наблюдаемый процесс соответствует классической картине для однофазного замыкания [2].

В тех же условиях выполнено двухфазное замыкание (рис. 6), фаза А замкнута с фазой В. Волновые диаграммы соответствуют диаграммам этого вида КЗ [2].

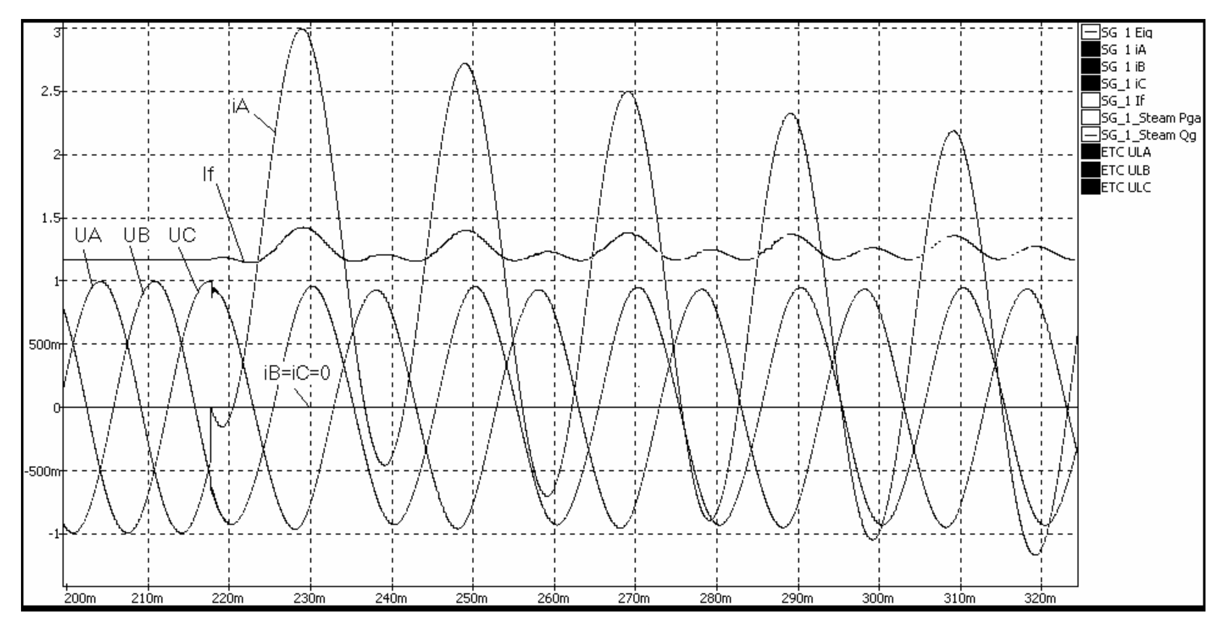


Рис. 5. *Однофазное КЗ на ЛЭП 110 кВ на расстоянии 1 км от шин блочного трансформатора 63 МВА электростанции*

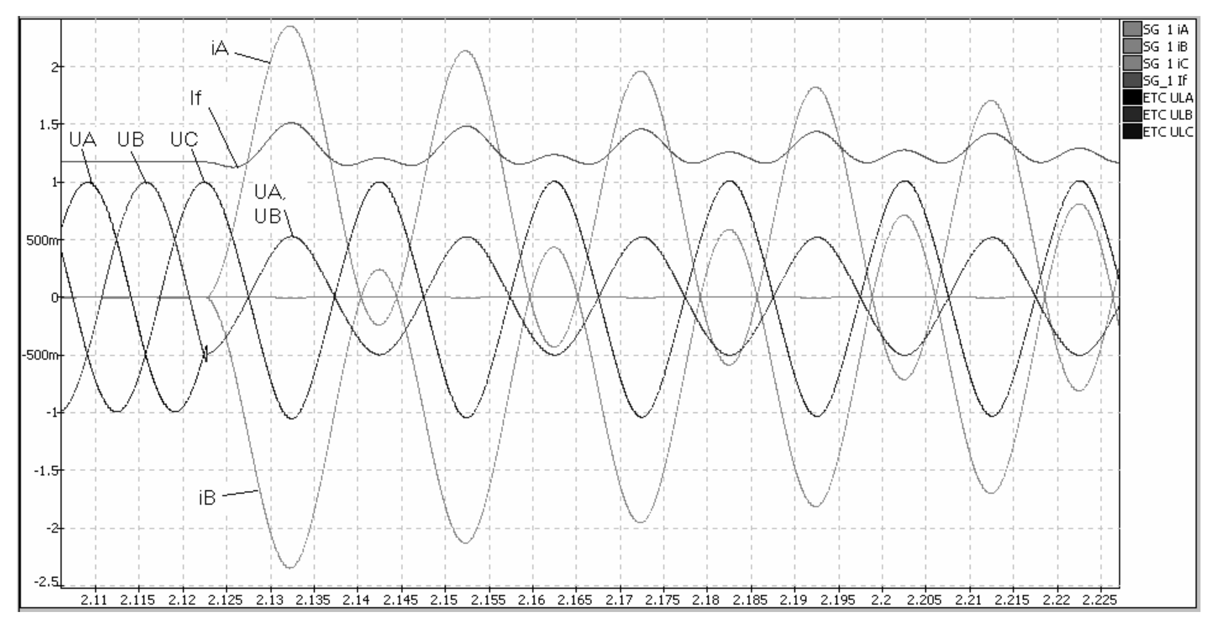


Рис. 6. *Двухфазное КЗ на ЛЭП 110 кВ на расстоянии 1 км от шин блочного трансформатора 63 МВА электростанции*

Проведенные опыты по моделированию электромеханических и электромагнитных переходных процессов, часть результатов из которых показаны на рисунках, выявили полное соответствие поведения модели исследуемой системе в классических режимах [2, 3, 7]. Это говорит о работоспособности цифровой модели, описываемой жесткой системой алгебро-дифференциальных уравнений с широким диапазоном разброса постоянных времени от 0,0001 до 30 с, адекватности поведения отдельных элементов и всей модели в установившихся и переходных режимах реальных электроэнергетических систем и ее пригодности к использованию в качестве учебно-исследовательского инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1970. – 472 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. –М.: Энергия, 1970. – 520 с.
3. Гибридный моделирующий комплекс Тюменской энергосистемы: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Томск: ТПУ, 1998. – 350 с.
4. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
5. Баушев В.С., Кобзев А.В., Тановицкий Ю.Н. Нормальные структуры динамических объектов и проблема качественного проектирования // В сб.: Вестник Красноярского государственного технического ун-та, посвященный 65-летию Б.П. Соустина / Под ред. Б.П. Соустина. – Красноярск: КГТУ, 1998. – С. 73–90.
6. Тановицкий Ю.Н., Изотов Д.А. Математическая модель электронных схем для анализа бифуркаций и хаотических явлений в импульсных системах электропитания // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – Київ, 2004. – С. 80–85.
7. Стернинсон Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и активной мощности в электрических системах. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.
8. Щегляев А.В., Смельницкий С.Г. Регулирование паровых турбин. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 256 с.